

การพยากรณ์ระยะการสุกของกล้วยหอมทอง โดยใช้การถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน Prediction of Ripening Stages of 'Hom Thong' Banana Using Partial Least Square Regression

ภูมิพงษ์ ชูช่วยสุวรรณ, เทพปัญญา เจริญรัตน์,

สุเพญญา จิตตพันธ์ และนวลกมล อำนวยสิน*

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

ฐิติพงษ์ กาวิชัย

กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ ส่วนการศึกษา

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ตำบลพรหมณี อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก 26001

Poompong Chuchouisuwan, Theppanya Charoenrat,

Supenya Chittapun and Nuankamol Amnuaysin*

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Thitipong Kawichai

Department of Mathematics and Computer Science, Academic Division,

Chulachomklao Royal Military Academy, Phrommani, Mueang, Nakhon Nayok 26001

Received: August 8, 2019; Accepted: September 2, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทางเคมีในระหว่างการสุกของผลไม้ไม่สามารถช่วยในการประมาณระยะการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลไม้ที่มีคุณภาพดีสำหรับการบริโภคและการใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีของผลกล้วยหอมทองที่ระยะการสุกต่าง ๆ และศึกษาความสัมพันธ์ของสมบัติของผลกล้วยต่อระยะการสุก โดยตรวจวัดน้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ ความแน่นเนื้อของเปลือกและเนื้อผล การเปลี่ยนแปลงของสีผล ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และปริมาณเอทีลินในระหว่างการสุก ผลการทดลองพบว่าสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีที่ตรวจวัดมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกของผลกล้วยหอม ยกเว้นปริมาณเอทีลิน โดยน้ำหนักสดมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกสูงที่สุด นอกจากนี้ยังสร้างตัวแบบแสดงความสัมพันธ์ด้วยการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน ซึ่งการวิเคราะห์พบว่าสมการที่สร้างโดยใช้น้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ และความแน่นเนื้อของเปลือกมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ระยะการสุกได้อย่างถูกต้อง ($r^2 = 0.979$, $SEE = 0.639$)

คำสำคัญ : กล้วยหอมทอง; การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทางเคมี; ระยะการสุก; การถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

Abstract

The study of physiological and chemical changes of fruit during ripening can help to estimate the optimal date for harvesting the best fruit quality for consumption and further utilization. The objectives of this research were to study physiological and chemical properties of banana fruit (*Musa acuminata*, AAA group, cultivar 'Hom Thong') at different ripening stages, and to determine the correlation between these properties and stages of ripening. Fresh weight, peel and flesh ratio, firmness of peel and flesh, peel color, total soluble solid content, titratable acidity and ethylene content of 'Hom Thong' banana fruit were measured during ripening period. The results demonstrated that all physiological and chemical properties had the correlation with ripening stages of banana fruit except ethylene content. Fresh weight showed the highest correlation with ripening stages. In addition, models for prediction of ripening stages were built with partial least square regression. It was found that the equation with three properties (fresh weight, peel and flesh ratio and peel firmness) gave the best predicting performance ($r^2 = 0.979$, $SEE = 0.639$).

Keywords: 'Hom Thong' banana; physiological and chemical change; ripening stage; partial least square regression

1. คำนำ

กล้วยหอมทองเป็นพืชอาหารที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุชนิดหนึ่งของโลก ซึ่งมีการเพาะปลูกกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยกล้วยหอมทองจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เพราะนอกจากการผลิตเพื่อการบริโภคภายในประเทศแล้ว ยังมีการส่งออกไปยังประเทศต่าง ๆ โดยเฉพาะตลาดประเทศญี่ปุ่น ซึ่งในปี พ.ศ. 2559 มีรายงานการใช้กล้วยหอมในประเทศไทย 113,703 ตัน และมีการส่งออกกล้วยหอมไปต่างประเทศ 3,725 ตัน ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 81.40 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559)

กล้วยเป็นผลไม้ประเภท climacteric fruit ซึ่งหลังการเก็บเกี่ยวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่าง ทั้งการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและการ

เปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในผล ได้แก่ ความเข้มข้นของเอทิลีนภายในผลและการผลิตเอทิลีนมากขึ้น อัตราการหายใจเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงถึงการเริ่มต้นของกระบวนการสุก การเปลี่ยนสีของเปลือกโดยผลไม้มักมีแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์เป็นองค์ประกอบอยู่แล้ว แต่ถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์บดบังเอาไว้ แต่เมื่อผลไม้เข้าสู่กระบวนการสุก คลอโรฟิลล์จะสลายตัวไปสีของแคโรทีนอยด์จึงปรากฏให้เห็น โดยที่ปริมาณของแคโรทีนอยด์ในผลไม้ค่อนข้างคงที่ไม่ได้เพิ่มขึ้น (จริงแท้, 2546) การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส เกิดการนิ่มลงของเนื้อเยื่อ (softening) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผนังเซลล์ เช่น สารประกอบพวกเพกทิน (pectin) โมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตเปลี่ยนแปลงไป เช่น แป้งเปลี่ยนเป็นน้ำตาล หรือน้ำตาลชนิดหนึ่งเปลี่ยนเป็นอีกชนิดหนึ่ง อัตราส่วนของ

น้ำตาลกับกรดเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ น้ำหนักเนื้อและเปลือกขณะที่เกิดการสุก ซึ่ง เกี่ยวข้องกับการสูญเสีย น้ำ การเปลี่ยนแปลงสาร ระเหย (volatile) และการเกิดกลิ่น โดยปกติเมื่อ ผลไม้สุกจะมีทั้งปริมาณและชนิดของสารระเหยเพิ่ม มากขึ้น และการเกิดกลิ่นเป็นผลมาจากการสร้าง สารผสมของสารระเหยหลายชนิด (Seymour *et al.*, 1993; Goulao and Oliveira, 2008) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสุกนั้น จะมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกของผล และเป็น ตัวกำหนดคุณภาพของผลไม้

การกำหนดระยะการเก็บเกี่ยวกล้วยที่ เหมาะสมต้องอาศัยความชำนาญของเกษตรกร และ มีปัจจัยสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น อายุ การเก็บเกี่ยวกล้วยในฤดูหนาวและฤดูร้อนจะไม่ เท่ากัน จึงอาจทำให้เกิดความไม่แน่นอนและเกิด ความผิดพลาดได้ โดยในกล้วยหอมทองยังคงพบ ปัญหาในการควบคุมการเก็บเกี่ยวให้ได้ตามระยะที่ ต้องการ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของกล้วยหอมทอง ในระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง นอกจากนี้ ช่วงเวลาที่เก็บเกี่ยวหรือระยะการสุกของผลผลิตที่ ต่างกันก็จะส่งผลต่อปริมาณและสมบัติของสารสกัด ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพต่าง ๆ ด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง สนใจศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทาง เคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการสุกของผลกล้วยหอมทอง ร่วมกับการนำเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ เข้ามาใช้ เพื่อจำแนกระยะการสุกของผล และนำไป ประยุกต์ใช้ร่วมกับดัชนีการเก็บเกี่ยวอื่น ๆ ในการ กำหนดระยะการเก็บเกี่ยวกล้วยหอมทองที่ถูกต้อง เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งในด้านของ การส่งออกไปขายยังประเทศต่าง ๆ ที่มีระยะเวลา ในการขนส่งและเก็บรักษาไม่เท่ากัน และในด้าน ของการเก็บเกี่ยวเพื่อนำไปใช้ในการสกัดสารออก ฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีสมบัติเป็นยา

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ตัวอย่างผลกล้วยหอมทอง

นำกล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*, AAA group) ในระยะ mature green (เปลือกสีเขียว ผลแข็ง) ความแก่ประมาณ 70 % จากสวนกล้วย ของเกษตรกรในจังหวัดปทุมธานี (เก็บเกี่ยวในช่วง เดือนสิงหาคม) มาตัดแบ่งออกเป็นแต่ละผล เลือก ผลกล้วยที่มีสีเขียวสม่ำเสมอและมีรอยตำหนิบนผิว ไม่เกิน 10 % เก็บรักษาผลกล้วยในกล่องกระดาษ แล้วนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 ± 10 % จากนั้นสุ่ม ตัวอย่างผลกล้วยที่ระยะการสุกต่าง ๆ ได้แก่ ระยะที่ 1 mature green (เปลือกสีเขียว ผลแข็ง) ระยะที่ 2 light green (เปลือกสีเขียวอ่อน) ระยะที่ 3 more green than yellow (เปลือกเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสี เหลืองมากขึ้น) ระยะที่ 4 more yellow than green (เปลือกมีสีเหลืองมากกว่าเขียว) ระยะที่ 5 yellow with green tip (เปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเขียว อยู่) ระยะที่ 6 full yellow (เปลือกสีเหลืองทั้งผล) ระยะที่ 7 yellow with brown flecks (เปลือกสีเหลือง มีจุดกระสีน้ำตาล) และระยะที่ 8 overripe (ผลสุกจน หมดอายุการเก็บรักษา) เพื่อมาตรวจวัดสมบัติทาง สรีรวิทยาและทางเคมี

2.2 สมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมี

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสด และอัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ

ชั่งผลกล้วยด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง เพื่อหาน้ำหนักสดของผล แล้วชั่งน้ำหนัก ของเปลือกและเนื้อกล้วย จากนั้นนำไปคำนวณหา อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงของสีผล

วัดการเปลี่ยนสีของเปลือกกล้วยด้วย เครื่องวัดสี (Konica Minolta รุ่น CR 10) ซึ่งสามารถ วัดสีออกมาเป็นค่า L^* , a^* , b^* , chroma (C) และ hue angle (H) โดยวัดที่ตำแหน่งหัว กลาง และ ปลายของผลกล้วย

2.2.3 ความแน่นเนื้อของเปลือกและเนื้อ
ผล

วัดความแน่นเนื้อของเปลือกและเนื้อ
ผลด้วยเครื่อง penetrometer (Lutron, Taiwan) โดยใช้หัวกดแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร กดลงบนเปลือกกล้วยและเนื้อกล้วย 3 ครั้งต่อผล ในตำแหน่งหัว กลาง และปลายของผล แปลงค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากกิโลกรัมเป็นนิวตัน

2.2.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้
(total soluble solids, TSS)

วิเคราะห์ปริมาณ TSS โดยนำเนื้อ
กล้วยที่ตำแหน่งกลางผลมาปั่นผสมกับน้ำกลั่นใน
อัตราส่วน 1 : 10 จากนั้นกรองเอาเฉพาะส่วนใสไป
วัดด้วยเครื่อง refractometer (Now, Japan)

2.2.5 ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้
(titratable acidity, TA)

นำส่วนใสที่ได้จากการเตรียมเพื่อ
วิเคราะห์ปริมาณ TSS มาไทเทรตด้วย 0.1 N
NaOH ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (AOAC, 2006)
แล้วนำปริมาตรของ NaOH ที่ได้มาคำนวณเป็น %
ของกรดมาลิก ดังนี้

ปริมาณกรดมาลิก (%) = [ปริมาตร
ของ NaOH (mL) x 0.1 x milliequivalent factor x
100] ÷ น้ำหนักของเนื้อผล (g)

โดย milliequivalent factor ของกรดมาลิก = 0.067

2.2.6 ปริมาณเอทีลีน

ชั่งน้ำหนักผลกล้วย ก่อนนำไปใส่ใน
ขวดโหลแก้วสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สขนาด 1.8
ลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างแก๊ส
จากขวดโหล แล้วนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง gas
chromatograph (Shimadzu, Japan) เพื่อคำนวณหา
ปริมาณแก๊สเอทีลีน ($\mu\text{L kg}^{-1}\text{hr}^{-1}$)

2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

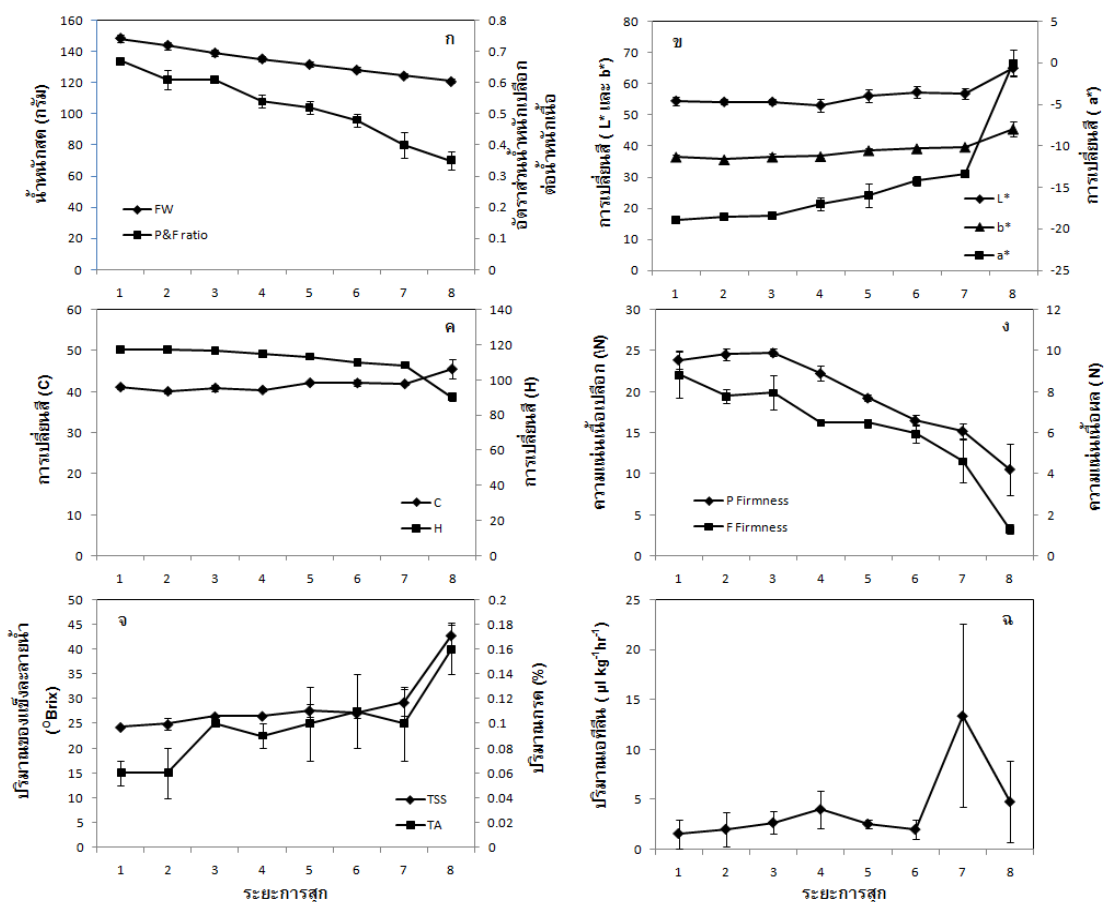
นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ
ด้วย one-way ANOVA และสร้างสมการในการ

พยากรณ์ด้วยการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด
บางส่วน (partial least square regression) โดยใช้
โปรแกรม IBM SPSS® Statistics และทดลองซ้ำ
จำนวน 4 ซ้ำ

3. ผลการวิจัย

การวัดสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีที่
เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการสุกของกล้วย
หอมทองที่ระยะการสุกต่าง ๆ พบว่าน้ำหนักสดของ
ผลลดลงเมื่อผลกล้วยหอมทองสุกมากขึ้น โดย
น้ำหนักสดจะลดลงตลอดระยะการสุก (รูปที่ 1ก) ใน
ทำนองเดียวกัน อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนัก
เนื้อก็มีค่าลดลงในระหว่างกระบวนการสุก (รูปที่
1ก) เมื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกและแสดง
ออกมาเป็นค่า L^* ซึ่งเป็นค่าที่บอกความสว่าง a^*
แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีเขียวไปเป็นสีแดง
 b^* แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสี
เหลือง C หรือ chroma บอกความบริสุทธิ์หรือความ
เข้มของสีเป็นระดับ และ H หรือ hue angle ที่
คำนวณมาจากค่า a^* และ b^* พบว่าค่า L^* , a^* , b^*
รวมทั้งค่า C มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน
คือ เพิ่มขึ้นตลอดระยะการสุก ขณะที่ค่า H มีค่า
ลดลง เมื่อผลกล้วยเข้าสู่ระยะการสุกที่เพิ่มขึ้น (รูปที่
1ข และ 1ค) ส่วนความแน่นเนื้อของทั้งเปลือกและ
เนื้อผลจะลดลงเมื่อผลกล้วยเข้าสู่ระยะที่ 3 ของการ
สุก (รูปที่ 1ง)

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำหรือ TSS พบว่า
มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้น โดย
เพิ่มจาก 24.30 °Brix เป็น 42.85 °Brix (รูปที่ 1จ)
เมื่อพิจารณาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้หรือ TA
พบว่าการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการสุก โดยมี
แนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (รูปที่ 1จ) สำหรับปริมาณเอทีลีน
พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงระยะที่ 4
ของการสุก ซึ่งเป็นระยะที่ผลกล้วยเริ่มเข้าสู่การสุก
และลดลงก่อนที่จะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งในระยะที่ 7 ที่



รูปที่ 1 น้ำหนักสดและอัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ (ก) สีของเปลือก (ข, ค) ความแน่นเนื้อของเปลือกและเนื้อผล (ง) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรด (จ) และปริมาณเอทิลีน (ฉ) ที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการสุกของผลกล้วยหอมทองที่ระยะการสุกต่าง ๆ (FW: น้ำหนักสด; P&F ratio: อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ; P firmness: ความแน่นเนื้อของเปลือก; F firmness: ความแน่นเนื้อของเนื้อผล; TSS: ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ; TA: ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้)

ผลกล้วยเริ่มเข้าสู่ภาวะเสื่อมถอย (senescence) (รูปที่ 1ฉ)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (one-way ANOVA) พบว่าสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีทั้ง 12 สมบัติ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะการสุกทั้ง 8 ระยะ (ตารางที่ 1) และหากพิจารณาจากค่า F พบว่าปริมาณเอทิลีน มีค่า F ต่ำที่สุด เนื่องจากความแปรปรวนของข้อมูลในระยะการสุกที่ 7 และ 8 มีค่าสูงมาก

เมื่อวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่ายพบว่า สมบัติทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกในระดับสูง ($r > 0.5$) ยกเว้นปริมาณเอทิลีน (ตารางที่ 2) โดยการศึกษาพบว่า น้ำหนักสดมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกสูงที่สุดในทิศทางตรงกันข้าม หมายความว่าหากระยะการสุกเพิ่มขึ้น น้ำหนักสดจะมีค่าลดลง และสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับระยะการสุกสูงรองลงมา คือ อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกใน

ทิศทางเดียวกัน สำหรับปริมาณเอทิลีนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาสุกในระดับปานกลาง ($r < 0.5$) และการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่าย โดยให้ตัวแปรตาม คือ ระยะเวลาสุก ตัวแปรอิสระ คือ สมบัติของผลกล้วยหอมทองที่วัดได้ เพื่อพิจารณาว่าสมบัติใดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะเวลาสุกมากที่สุด โดยสมการถดถอยจะอยู่ในรูป $\hat{Y} = b_0 + bX$ เมื่อ $\hat{Y}$ คือ ระยะเวลาสุก (นับจากจำนวนวันหลังการเก็บเกี่ยว หน่วย: วัน) และ X คือ ค่าของสมบัติที่วัด พบว่าสมการถดถอยทั้งหมดที่สร้างขึ้นสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ที่มีกับระยะเวลาสุกได้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (standard error of the estimate, SEE) ที่ได้นั้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน (ตารางที่ 2) แสดงว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นหลายสมการไม่ควรนำมาใช้ในการพยากรณ์ โดยสมการถดถอยที่สามารถใช้พยากรณ์ระยะเวลาสุกที่มีค่า SEE น้อยที่สุด คือ สมการถดถอยที่มีน้ำหนักสดเป็นตัวแปรอิสระ ซึ่งมีค่า SEE 0.872 วัน และสมการถดถอยที่มีค่า SEE ต่ำรองลงมา คือ สมการถดถอยที่ใช้อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อเป็นตัวแปร

อิสระ โดยมีค่า SEE 1.253 วัน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่ายของปริมาณเอทิลีนก็พบว่าสมการถดถอยที่สร้างโดยมีปริมาณเอทิลีนเป็นตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียวนั้นมีค่า SEE สูงที่สุด ดังนั้นจากการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่ายสามารถสรุปได้ว่าน้ำหนักสดและอัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาสุกมากที่สุด โดยได้สมการถดถอยสำหรับการพยากรณ์คือ $\hat{Y} = 73.915 - 0.499X$ เมื่อ X คือน้ำหนักสด และ $\hat{Y} = 28.774 - 41.798X$ เมื่อ X คือ อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการถดถอยทั้งสองยังมีค่าค่อนข้างสูง จึงต้องพัฒนาสมการถดถอยโดยใช้ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว จากการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square regression, PLSR) ต่อไป

การวิเคราะห์ PLSR ในการศึกษานี้จะกำหนดตัวแปรอิสระในการสร้างตัวแบบดังตารางที่ 3 โดยการคัดเลือกสมบัติของผลกล้วยหอมทองที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระจะพิจารณาจากค่าความสำคัญของตัวแปรบนโปรเจกชันของตัวแปรแฝงที่สร้างขึ้น และจากการวิเคราะห์ PLSR ได้ผลลัพธ์ค่าคงที่และ

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีในระหว่างระยะเวลาสุกของผลกล้วยหอมทองที่ระยะเวลาสุกต่าง ๆ และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

สมบัติ	ระยะเวลาสุก								F	Sig.
	1	2	3	4	5	6	7	8		
FW	148.34±2.26	143.93±2.40	139.07±1.93	135.31±1.71	131.76±1.64	128.23±1.66	124.49±1.41	120.95±1.37	107.58	0.000
L*	54.47±1.42	54.16±0.84	54.16±0.95	53.04±2.09	56.11±2.02	57.29±1.77	56.84±1.79	65.07±2.56	18.57	0.000
a*	-18.93±0.08	-18.55±0.04	-18.42±0.07	-17.01±0.74	-15.96±1.46	-14.23±0.55	-13.34±0.48	-0.03±1.60	214.15	0.000
b*	36.53±0.70	35.67±0.54	36.53±0.84	36.70±0.53	38.61±0.59	39.23±0.42	39.71±0.23	45.51±2.38	40.11	0.000
C	41.16±0.64	40.13±0.60	40.96±0.83	40.45±0.33	42.22±0.37	42.16±0.73	41.93±0.28	45.60±2.32	12.14	0.000
H	117.42±0.31	117.55±0.28	116.82±0.48	114.84±1.15	113.46±0.67	110.15±1.23	108.60±0.61	90.15±2.15	305.17	0.000
P&F ratio	0.67±0.01	0.61±0.03	0.61±0.01	0.54±0.02	0.52±0.02	0.48±0.02	0.40±0.04	0.35±0.03	81.00	0.000
P firmness	23.92±1.08	24.59±0.75	24.78±0.44	22.27±0.86	19.25±0.38	16.50±0.66	15.20±0.94	10.53±3.16	61.12	0.000
F firmness	8.84±1.14	7.79±0.33	7.97±0.84	6.50±0.10	6.48±0.21	5.96±0.44	4.63±1.06	1.30±0.23	50.78	0.000
TTS	24.30±0.00	24.88±1.15	26.48±0.05	26.55±0.06	27.63±1.24	27.15±1.10	29.30±2.76	42.85±2.50	63.07	0.000
TA	0.06±0.01	0.06±0.02	0.10±0.00	0.09±0.01	0.10±0.05	0.11±0.03	0.10±0.03	0.16±0.02	6.42	0.000
Ethylene	1.58±1.44	2.02±1.68	2.68±3.12	4.02±1.84	2.55±0.41	2.00±0.95	13.41±9.16	4.79±4.08	4.08	0.004

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่ายและการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่ายระหว่างสมบัติของผลกล้วยหอมทองและระยะเวลาสุก

สมบัติ	r	r ²	b ₀	b	F	Sig.	SEE
FW	-0.983	0.966	73.915	-0.499	853.751	0.000	0.872
L*	0.705	0.497	-40.021	0.834	29.626	0.000	3.357
a*	0.8	0.64	16.104	0.625	53.374	0.000	2.839
b*	0.823	0.678	-40.167	1.223	63.039	0.000	2.688
C	0.684	0.468	-65.332	1.729	26.381	0.000	3.452
H	-0.819	0.67	55.702	-0.438	61.029	0.000	2.717
P&F ratio	0.964	0.93	28.774	-41.798	397.856	0.000	1.253
P firmness	0.921	0.848	23.59	-0.845	167.384	0.000	1.845
F firmness	0.889	0.79	17.986	-1.777	112.636	0.000	2.171
TTS	0.74	0.548	-10.008	0.594	36.394	0.000	3.181
TA	0.706	0.499	-1.428	86.163	29.853	0.000	3.351
ethylene	0.418	0.175	5.402	0.387	6.361	0.017	4.299

r = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์; r² = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ; b₀ = ค่าคงที่; b = สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย; SEE = ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (standard error of the estimate, SEE)

ตารางที่ 3 จำนวนและคุณสมบัติที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระในการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

ตัวแบบที่	จำนวนตัวแปรอิสระ	สมบัติที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระ
1	12	FW, L*, a*, b*, C, H, P&F ratio, P firmness, F firmness, TTS, TA, ethylene
2	8	FW, a*, b*, H, P&F ratio, P firmness, F firmness, TTS
3	6	FW, a*, H, P&F ratio, P firmness, F firmness
4	4	FW, P&F ratio, P firmness, F firmness
5	3	FW, P&F ratio, P firmness
6	2	FW, P&F ratio

สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยในแต่ละตัวแบบดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับการพิจารณาประสิทธิภาพของตัวแบบที่ได้จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ หรือ SEE ควบคู่กับเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลที่พยากรณ์ได้ถูกต้อง เพราะหากพิจารณาเพียงค่า SEE เพียงอย่างเดียว จะไม่สามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของตัวแบบต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน โดยเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวจะคำนวณได้จากการ

พิจารณาด้วยการเปลี่ยนค่าของตัวแปรตามที่พยากรณ์ได้หรือระยะเวลาสุก ซึ่งนับจากจำนวนวันหลังการเก็บเกี่ยว จากข้อมูลเชิงปริมาณให้เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพแทน หลังจากเปลี่ยนเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพแล้ว ก็จะนับจำนวนข้อมูลที่พยากรณ์ได้ถูกต้อง เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลที่พยากรณ์ได้ถูกต้อง โดยค่า SEE และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลตัวแบบพยากรณ์ได้อย่างถูกต้องแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจากตัวแบบการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

สมบัติ	ตัวแบบที่					
	1	2	3	4	5	6
ค่าคงที่	59.672	55.034	57.884	58.919	58.928	60.355
FW	-0.305	-0.315	-0.320	-0.333	-0.333	-0.344
L*	-0.128					
a*	-0.012	-0.072	-0.089			
b*	0.094	0.033				
C	-0.011					
H	0.012	0.014	-0.002			
P&F ratio	-9.288	-8.01	-7.652	-7.582	-7.595	-14.023
P firmness	-0.195	-0.194	-0.200	-0.167	-0.167	
F firmness	-0.084	-0.205	-0.183	-0.002		
TTS	-0.030	-0.015				
TA	8.635					
ethylene	-0.013					

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (SEE) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลที่ตัวแบบพยากรณ์ได้ถูกต้องของตัวแบบที่ได้จากการถดถอยอย่างง่ายและการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

การถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน					
ตัวแบบที่	จำนวนตัวแปรอิสระ	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (วัน)	เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลที่พยากรณ์ได้ถูกต้อง (%)	r ²	Sig.
1	12	0.514	93.750	0.986	
2	8	0.607	90.625	0.980	ns
3	6	0.608	90.625	0.980	ns
4	4	0.637	90.625	0.980	ns
5	3	0.639	90.625	0.979	ns
6	2	0.723	84.375	0.975	*
การถดถอยอย่างง่าย					
FW	1	0.873	78.125	0.966	*
P&F ratio	1	1.253	56.250	0.930	*

* = significant; ns = not significant

ตารางที่ 5 พบว่าสมการการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนมีค่า SEE และความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าตัวแบบจากการถดถอยอย่างง่าย เมื่อพิจารณาจากค่า SEE และเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการพยากรณ์ และเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) พบว่าตัวแบบที่ 1-6 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถใช้ในการพยากรณ์ระยะการสุกได้ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากค่า SEE และค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการพยากรณ์อาจไม่สามารถเห็นได้ชัด จึงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า SEE กำลังสองระหว่างตัวแบบที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแบบที่ดีที่สุด แต่ต้องใช้สมบัติทั้งหมดในการพยากรณ์กับตัวแบบอื่นที่เหลือ เพื่อใช้พิจารณาการพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบอื่นนั้นมีความแตกต่างจากตัวแบบที่ดีที่สุดหรือไม่ แทนการพิจารณาจากค่า SEE และเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องโดยตรง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนที่ 1-6 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า SEE กำลังสองระหว่างตัวแบบที่ 1 กับตัวแบบที่ 2-6 พบว่าตัวแบบที่ 6 นั้นมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์แตกต่างจากตัวแบบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นตัวแบบที่เหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์จริง ซึ่งให้ความถูกต้องในการพยากรณ์ไม่แตกต่างจากตัวแบบที่ 1 แต่ใช้สมบัติน้อยที่สุด คือ ตัวแบบที่ 5 ที่ใช้ 3 สมบัติ ได้แก่ น้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ และความแน่นเนื้อของเปลือก โดยมีสมการถดถอย คือ $\hat{Y} = 58.928 - 0.333X_1 - 7.595X_2 - 0.167X_3$ เมื่อ $\hat{Y}$ คือ ระยะการสุก และ X_1 , X_2 และ X_3 คือ น้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ และความแน่นเนื้อของเปลือก ตามลำดับ

4. วิจารณ์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีของผลกล้วยหอมทองที่ระยะการสุกต่าง ๆ พบว่าน้ำหนักสดของผลและอัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อมีค่าลดลงตลอดระยะการสุก ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักสดส่งผลต่อคุณภาพและลักษณะภายนอกที่ปรากฏของผล โดยการศึกษาของ Tapre และ Jain (2012) ในกล้วยพันธุ์ Robusta ก็พบการลดลงของอัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความชื้นจากเปลือกสู่เนื้อผล เนื่องจากปริมาณน้ำตาลในเนื้อผลเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกที่แสดงออกมาเป็นค่า L^* , a^* , b^* รวมทั้งค่า C มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการสุก ขณะที่ ค่า H ลดลงสอดคล้องกับสีของเปลือกกล้วยหอมทองที่เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองเมื่อเข้าสู่กระบวนการสุก

ความแน่นเนื้อของเปลือกและเนื้อผลลดลงเมื่อผลกล้วยหอมทองเกิดการสุกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการลดลงของความแน่นเนื้อเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงในผนังเซลล์และชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella) จนนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผนังเซลล์ (Amnuaysin *et al.*, 2012) ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำและปริมาณกรดที่ส่งผลต่อรสชาติของผลกล้วยหอมทอง พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำเป็นลักษณะทั่วไปที่พบได้ในช่วงการสุกของกล้วย โดยเป็นผลมาจากการที่แป้งเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลเพิ่มขึ้น (Fernando *et al.*, 2014) และในการศึกษาของ Tapre และ Jain (2012) พบว่าปริมาณกรดของกล้วยพันธุ์ Robusta เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จนถึงระยะที่มีการสุกเต็มที่ สำหรับเอทิลีนซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสุกและการเสื่อมถอยของพืช จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อผลกล้วยเริ่มเข้าสู่การสุก และเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อผลกล้วยเริ่มเกิดการเสื่อมถอย

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างสมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีของผลกล้วยหอมทองและระยะการสุก พบว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับสูง ยกเว้นปริมาณเอทิลีน เพราะข้อมูลมีการกระจายตัวแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งการศึกษาก่อนหน้านี้ในส้มโอ พบว่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น สี เนื้อ ความแน่นเนื้อ ปริมาณกรด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลในระหว่างการเก็บรักษา (อรุณญา และคณะ, 2557) โดยการศึกษาครั้งนี้พบว่าน้ำหนักสดมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกสูงที่สุด รองลงมา คือ อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ ส่วนปริมาณเอทิลีนมีความสัมพันธ์ในระดับปานกลาง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่พบว่าปริมาณเอทิลีนมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มน้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่าระยะการสุกที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลต่อปริมาณเอทิลีนอย่างชัดเจน และเมื่อนำสมบัติของผลกล้วยหอมทองที่วัดได้และระยะการสุกไปวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่ายก็ได้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย คือ น้ำหนักสดและอัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกมากที่สุด แต่ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการถดถอยทั้งสองมีค่าค่อนข้างสูง

เมื่อวิเคราะห์การถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน ซึ่งเป็นการสร้างตัวแบบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระหลายตัวแปร โดยอาศัยตัวแปรแฝงที่ไม่มีความสัมพันธ์กัน ทำให้ไม่ละเมิดข้อสมมติของการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างสมการถดถอยที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (SEE) ที่ต่ำกว่าและพยากรณ์ข้อมูลได้แม่นยำกว่า พบว่าสมการการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนมีค่า SEE และความแม่นยำ

ในการพยากรณ์สูงกว่าตัวแบบจากการถดถอยอย่างง่าย โดยตัวแบบที่ 1 จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการพยากรณ์ระยะการสุก แต่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการพยากรณ์จริง เนื่องจากตัวแบบที่ 1 ใช้สมบัติทั้งหมดในการพยากรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า SEE กำลังสองระหว่างตัวแบบที่ 1 กับตัวแบบที่เหลือ (2-6) พบว่าตัวแบบที่ 5 ที่สร้างจากน้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ และความแน่นเนื้อของเปลือกให้ความถูกต้องในการพยากรณ์ไม่แตกต่างจากตัวแบบที่ 1 แต่ใช้สมบัติน้อยที่สุด จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการพยากรณ์ระยะการสุกของผลกล้วยหอมทองได้

5. สรุป

สมบัติทางสรีรวิทยาและทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการสุกของผลกล้วยหอมทองมีความสัมพันธ์กับระยะการสุก โดยน้ำหนักสดมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกสูงที่สุด และการสร้างตัวแบบแสดงความสัมพันธ์ด้วยการถดถอยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน พบว่าสมการที่สร้างโดยใช้น้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ และความแน่นเนื้อของเปลือกมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ระยะการสุกได้อย่างถูกต้อง ได้ค่า $r^2 = 0.979$ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ 0.639 วัน และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลที่พยากรณ์ได้ถูกต้อง 90.625 % จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักสด อัตราส่วนน้ำหนักเปลือกต่อน้ำหนักเนื้อ และความแน่นเนื้อของเปลือก ซึ่งเป็นสมบัติทางสรีรวิทยาที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน สามารถนำไปใช้ในการจำแนกระยะการสุกของผลกล้วยหอมทอง และอาจนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับดัชนีการเก็บเกี่ยวอื่น ๆ เพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำในการกำหนดระยะการเก็บเกี่ยวและระยะพัฒนาการของผล ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อกิจการด้านเทคโนโลยี

หลังการเก็บเกี่ยว และด้านการศึกษาเกี่ยวกับสารสกัดจากผลกล้วยหอมทองที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพและมีสมบัติเป็นยาต่อไปในอนาคตได้ ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่สนับสนุนเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

6. รายการอ้างอิง

จริงแท้ ศิริพานิช, 2546, สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้, พิมพ์ครั้งที่ 5, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559, สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า, เอกสารสถิติการเกษตร เลขที่ 402, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, 111 น.

อรัญญา นิพนธ์ศักดิ์, ญัฐฐา เล่ากุลจิตต์ และอรพิน เกิดชูชื่น, 2557, ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสารหอมระเหยและคุณภาพทางกายภาพ-เคมีของส้มโอตัดแต่งสตรหว่างการเก็บรักษา, ว.วิจัยและพัฒนา มจร. 37(3): 331-346.

Amnuaysin, N., Seraypheap, K. and Kidyoo, M.,

2012, Anatomical changes in peel structure of 'Hom Thong' banana during fruit development and ripening, Trop. Nat. Hist. 12: 127-136.

AOAC, 2006, Official Methods of Analysis, 18th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburgs, MD.

Fernando, H.R.P., Srilaong, V., Pongprsert, N., Boonyarittthongchai, P. and Jitareerat, P., 2014, Changes in antioxidant properties and chemical composition during ripening in banana variety 'Hom Thong' (AAA group) and 'Khai' (AA group), Int. Food Res. J. 21: 749-754.

Goulao, L.F. and Oliveira, C.M., 2008, Cell wall modifications during fruit ripening: when a fruit is not the fruit, Trends Food Sci. Technol. 19: 4-25.

Seymour, G.B., Taylor, J.E. and Tucker, G.A., 1993, Biochemistry of Fruit Ripening, Chapman & Hall, London.

Tapre, A.R. and Jain, R.K., 2012, Study of advanced maturity stages of banana, Int. J. Adv. Eng. Res. Stud. 1: 272-274.